

浅床栽培法を用いたレンコンの省力栽培における ハスの生育・収量・品質および養分動態の評価*

当真 要¹⁾・岩本玲奈¹⁾・稲吉佳緒里¹⁾
長崎信行²⁾・上野秀人¹⁾

Evaluation of the growth of lotus (*Nelumbo nucifera*), yield and quality of lotus root,
and soil nutrient dynamics on shallow soil cultivation system

Yo Toma¹⁾, Rena Iwamoto¹⁾, Kaori Inayoshi¹⁾, Nobuyuki Nagasaki²⁾, Hideto Ueno¹⁾

Summary

Much effort for harvesting rhizome of lotus has been required on the lotus cultivation. In our study, growth of lotus, yield and quality of rhizome, soil nutrient dynamics and irrigation were evaluated on the shallow soil cultivation system. Chemical (C) and organic (O) fertilizer application plots were set up at the pool installed 10-cm depth of soil in 2011 and 2012. Nitrogen (N) and phosphorus application rate were same between two plots, while potassium (K) application in O plot was only 30% of that in C plot due to low concentration of K in organic fertilizer. Yields of rhizome (3.15 to 3.93 kg m⁻²) were larger than that in conventional cultivation, and there was no difference in the yield between the plots. In C plot, rhizome of 100-200 g was tended to larger than in O plot might be due to much K application in C plot. That is supported by the result more than 50% of K in lotus was concentrated in the rhizome. Color of the rhizome was almost same between two plots. However, color of the rhizome in 2013 was significantly white compared with that in 2012, because soil iron oxide, which was causal material for brown color of rhizome, might be reduced during the winter. Cation exchange capacity, soil total carbon and N concentration, and exchangeable K concentration reduced 14-55% after two cultivations. This showed that soil nutrient reduced by plant uptake should be supplied by organic matter or other materials. Irrigation amount of water during the cultivation was approximately 1,000 mm. However, water should be supplied when evapotranspiration was greater than precipitation, especially in August and September. This study showed that high yield and quality of lotus rhizome was promising at the soil shallow cultivation system, though management for maintaining soil fertility would be required.

1) 愛媛大学農学部 (Faculty of Agriculture, Ehime University)

2) 長崎工業株式会社 (Nagasaki Industrial Co. Ltd.)

* 本論文は日本土壌肥科学雑誌第86号第2号 p.89-97 (2015) に掲載された。

緒 言

湛水状態で栽培されるハス (*Nelumbo nucifera*) は、水田における転作作物として栽培されることがある。ハスの肥大茎であるレンコンは価格が最も高くなる12月で約440円 kg^{-1} であり(農林水産省, 2013)、10 aあたりの卸価格(約66万円、収量は一般的に約1,500 $\text{kg} \ 10 \text{ a}^{-1}$)は水稲(約15万円)よりも高く、転作作物として有力な作物である。しかしながら、需要の最盛期が気温の低い12月であり、収穫方法はクワ掘りや水圧掘り等で行われることが多く、収穫時の重労働が問題となっている(牧山, 2010)。さらに、水圧掘りにおいては収穫時に土壌懸濁水が多量に流出することで水圏の汚染が以前より指摘されている(小松ら, 1989)。従って、労働および環境に対する負荷の少ない収穫方法がレンコン栽培における課題となっている。

近年、レンコンの新たな栽培方法として浅床栽培法が確立された(小笹, 2008)。このレンコン浅床栽培法は、コンクリートもしくは防水シートでプールを設け、一般的なレンコン栽培圃場の表層土壌に類する土壌を厚さ10cm程度になるよう充填しハスを栽培する方法である。この栽培方法によって栽培されたレンコンは土壌の浅い位置で生長するため、収穫時の作業が大幅に軽減される。また、栽培環境が閉鎖的であるために、水圧掘りにおいても土壌や栄養塩の系外への流出がない。さらに、強い風が吹いた場合地下茎が土ごと回転することで茎が折れにくい。以上の様なメリットがあるが、この栽培方法におけるレンコンの生育特性、収量、品質の実態についての報告はない。さらに、浅床栽培では地下浸透による肥料成分の損失がないことに加え、レンコンの生育深度が浅いため施用した肥料成分の損失が少ないと推測される。したがって、浅床栽培では従来の施肥基準よりも少ない窒素施用量での栽培が可能と考えられる。また、予想される追肥の施肥効率の高さは、一般的に肥効率が低い有機肥料のデメリットを補うと考えられ、有機肥料を用いた有機栽培が可能であると考えられる。有機栽培において慣行栽培と同程度の収量が得られれば、レンコン栽培における収入が大きく改善することが期待される。本研究においては、浅床栽培法を用いたハス栽培におけるハスの生育・収量を評価する他、ハスの浅床栽培が土壌肥沃度に与える影響についても評価した。

材料及び方法

調査地および処理区

2012年および2013年に愛媛大学農学部附属農場(北緯33度6分、東経132度5分、標高31m)にて実験を行った。愛媛県松山市の1981年から2010年の年平均気温は16.5 $^{\circ}\text{C}$ であり、年平均降水量は1,315mmである(松山地方気象台, 2014)。雨を遮るために上部に透明なビニールが張られ側面は開放状態にある野外の試験地に、縦1.2m横2.2m高さ0.45mの枠を設け、枠の中に厚さ0.4mmの防水シート(ビノン土木用シート、SNX-XC、シーアイ化成)を敷いて水漏れを防いだ。各枠には水道メーター(エコメーター、DX13、金門製作所)およびバルブを取り付け、灌漑設備を設けた。各枠には花崗岩を母材とする水田の表層土壌を乾土換算で527 kg (厚さ約10cm)を充填した。この土壌の全炭素(C)、全窒素(N)含量およびC/N比はそれぞれ18.8 $\text{g-C} \ \text{kg}^{-1}$ 、1.79 $\text{g-N} \ \text{kg}^{-1}$ 、および10.4であった。単位面積あたりの土壌の全C量と全N量は3,754 $\text{g-C} \ \text{m}^{-2}$ および357 $\text{g-N} \ \text{m}^{-2}$ である。またpH(H_2O)は5.47、アンモニウム態Nおよび硝酸態N含量はそれぞれ5.51 $\text{mg-N} \ \text{kg}^{-1}$ および66.1 $\text{mg-N} \ \text{kg}^{-1}$ であった。陽イオン交換容量(CEC)は13.5 $\text{cmolc} \ \text{kg}^{-1}$ 、交換性カリウム(K)、マグネシウム(Mg)、カルシウム(Ca)、およびナトリウム(Na)含量はそれぞれ251 $\text{mg-K} \ \text{kg}^{-1}$ 、

160mg-Mg kg⁻¹、709mg-Ca kg⁻¹、71mg-Na kg⁻¹であり、塩基飽和度は44.8%であった。可給態リン含量と遊離酸化鉄含量はそれぞれトルオーグ法（南条, 2000）および浅見・熊田法（志賀, 2011；Asami and Kumada, 1959）を用いて分析し、可給態リンおよび遊離酸化鉄含量はそれぞれ67.6 mg-P kg⁻¹（310mg-P₂O₅ kg⁻¹）および5.17g-Fe kg⁻¹であった。粗砂、細砂、シルト、粘土含量はそれぞれ44.5%、30.6%、8.30%、および16.5%で土性は砂質植壤土に分類された。土壤肥沃度は中～低程度で本試験の実施地域では比較的一般的な土壤である。

施用する肥料の種類の違いで化学肥料区（C区）および有機肥料区（O区）の2処理区をそれぞれ3および4反復で設けた。C区には高度化成肥料（14-14-14）、尿素、および塩化カリウムを使用し、O区にはナタネ油かすと鶏糞を使用した。C区の施肥はP全量を高度化成肥料で施用し、NとKの不足分をそれぞれ尿素または塩化カリウムで補った。C区のN、P、およびK施用量は農林水産省が示す施肥基準の約2割減とし（農林水産省, 2010）、それぞれ28g-N m⁻²、3.6g-P m⁻²（16.5g-P₂O₅ m⁻²）および10.4g-K m⁻²（25g-K₂O m⁻²）とした。O区においては使用した肥料の組み合わせからKのみ3.2g-K m⁻²（7.6g-K₂O m⁻²）であった。施肥基準では3回の追肥を推奨しているが、1回目と2回目の追肥間隔が短いことから2回目を省略し、それぞれの区において肥料は基肥と2回の追肥（2回目は止肥）に分けて施用した（第1表）。各追肥の時期はハスの生育を観察し決定した。

第1表 化学肥料区（C区）および有機肥料区（O区）における、窒素(N)、リン(P)、カリウム(K)の施用量

	C区			O区		
	N	P	K	N	P	K
	(g m ⁻²)					
基肥	18	2.2	6.2	18	2.2	2.0
追肥1	7.0	0.76	2.1	7.0	0.74	0.66
追肥2（止肥）	3.0	0.65	2.1	3.0	0.63	0.54
合計	28	3.6	10.4	28	3.6	3.2

本研究では栽培にハスの‘オオジロ’を用いた。早生品種であるオオジロは主な栽培地域が岡山や徳島で腐敗病に対する耐性が強く、地下部がそれほど深く潜らない。各枠に2節程度（芽の数が3～4）で重さが約400g（151g m⁻²）を各枠に1本ずつ定植した（両年共に4月3日）、定植後2ヶ月程度は低温による影響を小さくするために水深を20cm程度に保ち、6月以降は10cm程度に維持した。基肥は両年共に定植前の4月1日に行い、2012年の1回目の追肥は6月11日（定植後69日目）、2013年は6月1日（定植後59日目）であった。また、2012年の2回目の追肥は7月20日（定植後108日目）、2013年は7月15日（定植後103日目）であった。基肥施用は全層施肥とし、追肥は表面施用とした。浅床栽培法では水の下方浸透がなく水の損失は蒸発散のみで冬期は湛水状態となることが多いと推測されたため、2012年の栽培後は湛水状態を維持し土壤を乾燥させることなく2013年の栽培を行った。

栽培期間中の生育・土壌調査および収量・品質調査

栽培期間中、全ての浮き葉と立ち葉の数を調査し、さらに各枠3本の立ち葉の高さ、水面付近の茎の直径、および葉色値（SPAD-502、コニカミノルタ社）を測定した。収穫は10月6日（2012年）および9月25日（2013年）に行い、それぞれ約1週間前に茎刈りを行った。収穫には各枠の全ての植物体を採取し、肥大茎の数と重さを測定した。その後、各枠につき5個の肥大茎を無作為に選び、色彩色差計（CHROMA METER CR-200、ミノルタ社）を用いて1個あたり20反復でL値およびa値を測定した。用いた色差計では実際に見ているものに近い色を評価する拡散照明垂直受光方式（反射光含む）でL値とa値を測定した。L値は見た目の濃さを表し、値が高くなる程白くなる。またa値は緑から赤までの色相を表し、正の値が高くなる程赤みがかかった色となる。

生育期間中、各枠の土壌を先の切断した20mLのシリンジを土壌表層から垂直に差し込み、全深度から均等に土壌を採取した。採取土壌については、脱塩水で1:2.5抽出のpH（H₂O）を測定し、10%KClで1:10抽出のアンモニウム態Nおよび硝酸態N含量をそれぞれインドフェノール青法（日高，2000）、および塩化バナジウムⅢによる発色法で分析した（Doane and Horwath, 2003）。さらに、収穫直前の2012年10月1日と2013年9月20日の土壌の活性二価鉄含量を、pH3.0の1M酢酸緩衝液抽出法（高井ら，1958）およびo-フェナントロリンによる比色法（本村，2011）で求めた。また、2012年の栽培前および2013年の栽培後の土壌pH（H₂O）、CEC、全C含量、全N含量、交換性カリウム含量、可給態リン含量を求めた。CECは浸透抽出法（村本ら，1992）、全Cおよび全N含量はNCアナライザー（スミグラフNC-80、島津製作所）を用いた乾式燃焼法、可給態リン含量の測定にはトルオーグ法を用いた（南条，2000）。

気象データ

試験地中央部の強制通風式の放射よけ内に温度センサー（おんどとり TR71U、T&D）を設置し、地表面から150cmの高さの気温を15分毎に測定した。

統計解析

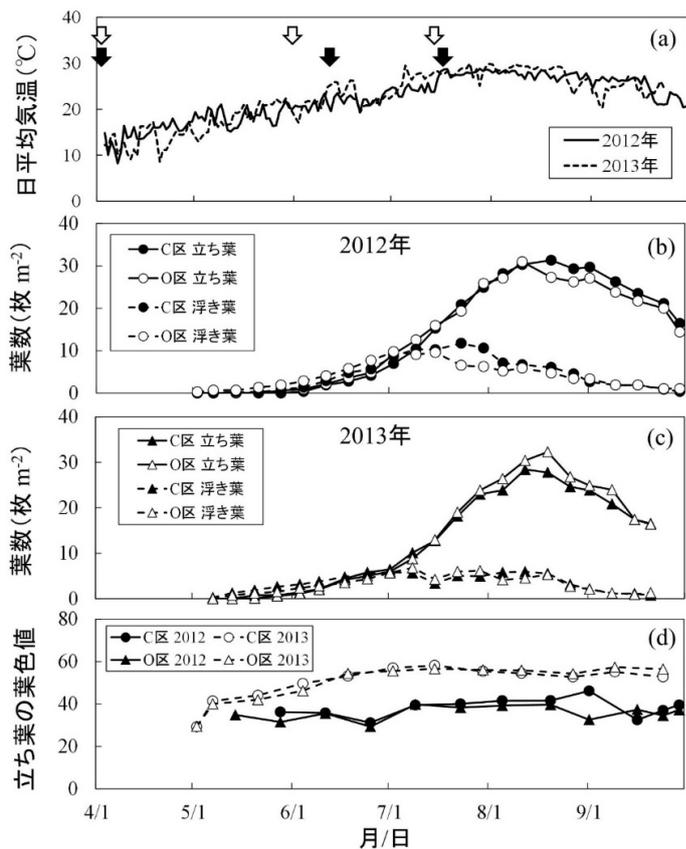
年度および処理区間の差の検定に二元配置分散分析を行った。統計解析にはエクセル統計（var 4.0, ㈱社会情報サービス）を用いた。

結 果

気象条件とハスの生育および土壌無機態窒素含量の季節変化

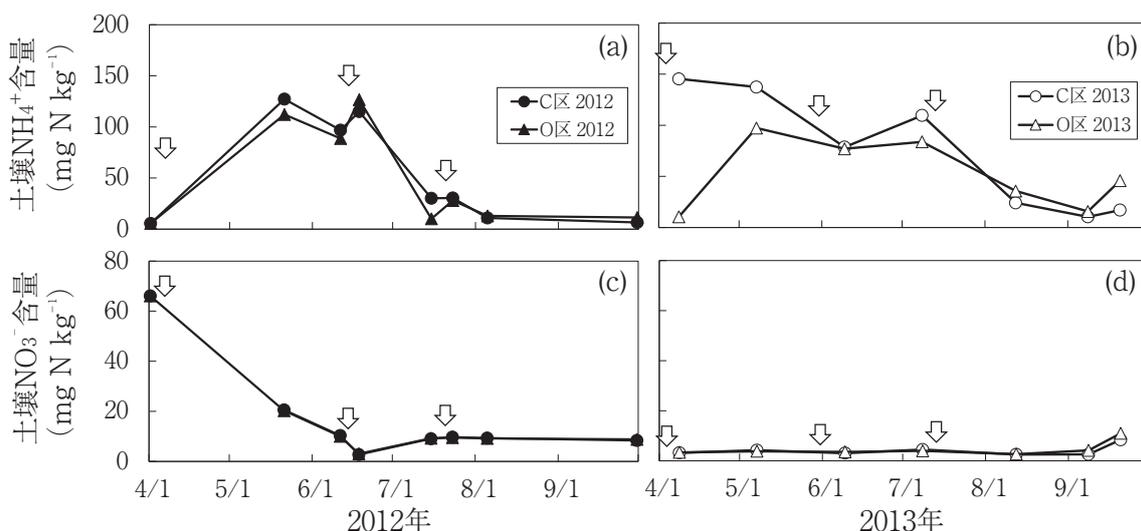
2012年および2013年の栽培期間中（4月～9月）の日平均気温はそれぞれ22.3℃であった（第1図a）。葉数は2012年には浮き葉のピークがC区とO区共に7月後半であったのに対し、立ち葉は8月半ば頃に最大（両処理区共に平方メートルあたり31枚）となりその後ゆるやかに低下した（第1図b）。また、2013年の浮き葉は7月前半から8月半ばまで同数を維持し、その後低下していた（第1図c）。2013年の浮き葉は8月に最大となったが、その後急激に低下し、9月半ばには半分程度までに減少した。どちらの年もC区とO区間に明確な違いは認められなかった。立ち葉の葉色値は2012年にほぼ一定（30後半）で推移したが、2013年は5月から7月にかけてゆるやかに上昇した後、一定（50～60）で推移した（第1図d）。

2012年のアンモニウム態N含量および硝酸態N含量は、C区とO区共に同程度で推移していた（第



第1図 日平均気温 (a)、および化学肥料区 (C区) と有機肥料区 (O区) のハスの浮き葉および立ち葉の枚数 (b、c)、および立ち葉の葉色値 (d)、の季節変化。黒矢印は2012年の施肥時期、白矢印は2013年の施肥時期を示す。

2図 a、c)。アンモニウム態N含量は施肥後の5月末にはC区とO区は同程度 (約 120 mg-N kg^{-1}) に上昇しており、その後ハスの生育が旺盛な7月以降は 30 mg-N kg^{-1} 以下で推移していた。2012年の硝酸態N含量は栽培前から大きく低下し、6月以降は両処理区共に約 10 mg-N kg^{-1} で推移していた。2013年のアンモニウム態N含量はC区でO区よりも高く推移する傾向が見られたが、硝酸態N含量はほぼ同じ値で推移していた (第2図 b、d)。アンモニウム態N含量はC区で施肥直後から 150 mg-N kg^{-1} 程度まで上昇していたが、O区では施肥直後は $10.4 \text{ mg-N kg}^{-1}$ と低く、基肥施用後1ヶ月が経過した5月には 100 mg-N kg^{-1} まで上昇していた。その後は徐々に低下し、8月以降は 50 mg-N kg^{-1} 以下で推移していた。



第2図 浅床栽培における、化学肥料区 (C区) および有機肥料区 (O区) の2012年と2013年のアンモニウム態窒素 (a、b) および硝酸態窒素含量 (c、d) の推移。矢印は施肥時期を示す。

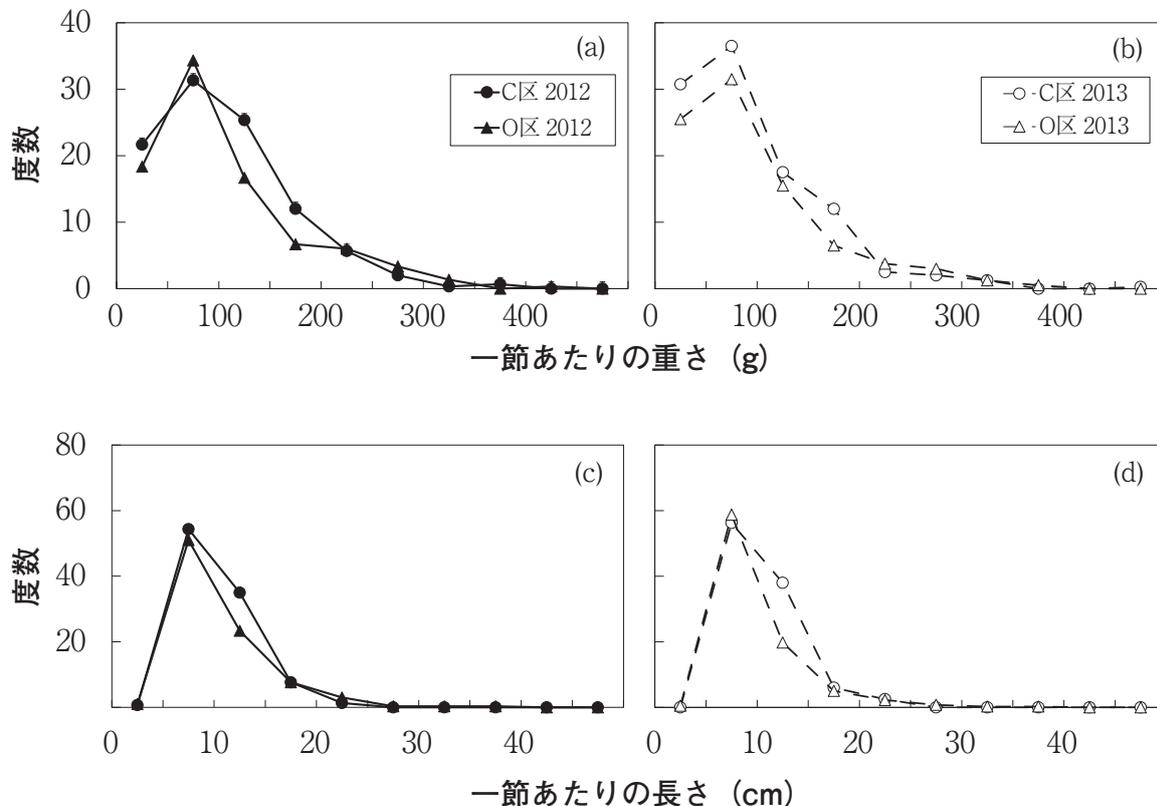
肥大茎の収量と色

各処理区における2012年と2013年の肥大茎の収量、一節あたりの重さ、および節の数を第2表に示した。肥大茎の収量や一節あたりの重さ、および節の数はそれぞれ処理区間および年の違いに有意な差は見られなかった。しかし、両区共に2012年の収量は2013年より約15%多く、さらに両年共にC区の収量がO区より9%程度多くなる傾向が見られた。節の数はC区およびO区共に2012年が2013年と比較して14~17%程度多かった。一節あたりの重さは10gから485gと大きくばらついていた

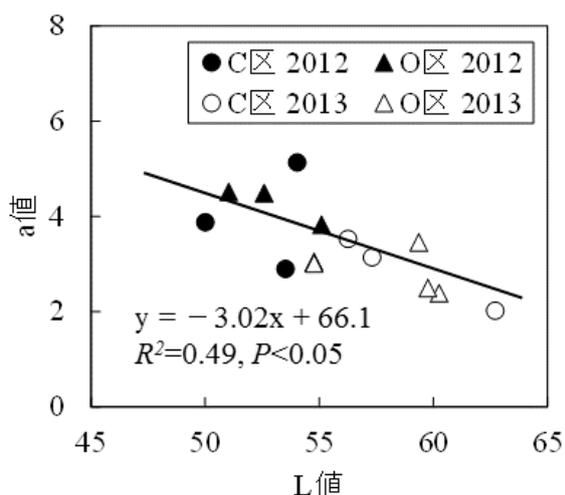
第2表 浅床栽培における化学肥料区（C区）および有機肥料区（O区）の肥大茎の収量、一節あたりの重さ、節の数（平均値±標準偏差）

処理区	収量 (kg m ⁻²)		一節あたりの重さ (g)		節の数	
	2012年	2013年	2012年	2013年	2012年	2013年
C区	3.93 ± 1.03	3.42 ± 0.46	39.8 ± 0.8	39.8 ± 5.4	99.0 ± 27.2	87.0 ± 18.0
O区	3.62 ± 0.52	3.15 ± 0.75	36.1 ± 5.8	36.7 ± 5.4	103 ± 24.1	87.5 ± 24.2
年次	P=0.23		P=0.30		P=0.89	
処理区	P=0.46		P=0.87		P=0.23	
交互作用	P=0.96		P=0.90		P=0.91	

反復はC区でn = 3およびO区でn = 4.



第3図 浅床栽培における、化学肥料区（C区）および有機肥料区（O区）の2012年と2013年の収穫時のレンコンの一節あたりの重さの50g区分の度数分布（a、b）および5cm区分の長さの度数分布（c、d）。



第4図 浅床栽培における、化学肥料区（C区）および有機肥料区（O区）の収穫時のレンコンのL値およびa値の関係

たが、2年の調査期間を通じて150g以下のものが81%を占めていた（第3図 a、b）。一節の長さも同様に、15cm以下のものが90%を占めていた（第3図 c、d）。L値の平均は2012年のC区で52.5およびO区で53.4であり、2013年のC区では58.8およびO区で58.5となっていた。L値は処理区間に差はなかったが、2013年が2012年よりも有意に高く（ $P < 0.01$ ）、2013年の方が肥大茎の色が白かった。また、a値も同様に2013年の方が2012年よりも有意に低く（ $P < 0.05$ ）、2013年の方が肥大茎の赤みが薄かった。L値とa値には有意な負の相関があり（ $R^2 = 0.49$ 、 $P < 0.05$ ）、肥大茎は赤みが薄くなるほど白くなっていた（第4図）。

ハスの養分吸収

ハスの部位別N、P、K吸収量を第3表に示した。2年間の吸収量の合計はC区でそれぞれ $42.4 \pm 6.35 \text{g-N m}^{-2}$ （平均値 \pm 標準偏差）、 $9.16 \pm 0.87 \text{g-P m}^{-2}$ 、 $94.7 \pm 14.1 \text{g-K m}^{-2}$ 、O区でそれぞれ $49.9 \pm 5.21 \text{g-N m}^{-2}$ 、 $9.85 \pm 1.43 \text{g-P m}^{-2}$ 、 $71.0 \pm 9.2 \text{g-K m}^{-2}$ であった。部位別の平均吸収割合は各養分で大きな違いはないが、NとKはそれぞれ肥大茎に多く蓄積しており、Pは地下茎・節に多く蓄積していた。2年間のN、P、Kの施用量の合計はC区でそれぞれ 56g-N m^{-2} 、 7.42g-P m^{-2} 、 20.8g-K m^{-2} であり、O区ではNとPはC区と同量だがKは 6.40g-K m^{-2} である。このことから、C区ではN吸収量が施用量よりも 13.6g-N m^{-2} 小さく、P吸収量は施用量よりも 1.74g-P m^{-2} 大きく、K吸収量は施用量よりも 77g-K m^{-2} 大きかった。また、O区ではN吸収量が施用量よりも 6.1g-N m^{-2} 小さく、P吸収量は施用量よりも 2.43g-P m^{-2} 大きく、K吸収量は施用量よりも 50.3g-K m^{-2} 大きかった。

土壌化学性の変化

収穫直前の活性二価鉄含量は2012年のC区とO区でそれぞれ $324 \pm 24.6 \text{mg-Fe kg}^{-1}$ および $324 \pm 110 \text{mg-Fe kg}^{-1}$ 、2013年はそれぞれ $3,332 \pm 1010 \text{mg-Fe kg}^{-1}$ および $4,748 \pm 1,139 \text{mg-Fe kg}^{-1}$ であり、2013年の値が2012年の10倍以上高かった（ $P < 0.001$ ）。一方で両年共に処理区間の差はなかった。2012年の調査開始前および調査終了時（2013年栽培後）の土壌のpH、CEC、全C含量、全N含量、交換性K含量、および可給態リン含量を第4表に示した。pHは2年の調査期間を通しC区では12.7%、O区では17.0%上昇していた。CECはC区で54.0%、O区で54.7%低下していた。C区とO区的全C含量はそれぞれ20.2%および29.1%の減少、全N含量はそれぞれ31.1%および38.0%の減少であった。これらの値から、全Cと全Nの変化量はそれぞれC区で 852g C m^{-2} および 111g-N m^{-2} 、O区で $1,429 \text{g-C m}^{-2}$ および 136g-N m^{-2} であった。可給態リン含量はC区で4.8%（ 0.65g-P m^{-2} ）上昇、O区で12.1%（ 1.63g-P m^{-2} ）低下していた。交換性K含量はC区で14.0%（ 43.0g-K m^{-2} ）、O区で14.4%（ 42.9g-K m^{-2} ）減少していた。

第3表 ハスの地上部、地下茎・節、および肥大茎における窒素 (N)、リン (P)、およびカリウム (K) の吸収量と部位別の割合 (平均値±標準偏差)

	部位	C区			O区			
		2012年	2013年	割合 (%)	2012年	2013年	割合 (%)	
N (g-N m ⁻²)	地上	3.79±0.92	5.93±2.38	22.4	3.88±0.58	6.93±1.53	21.6	
	地下	地下茎・節	5.35±1.13	8.22±0.68	32.0	5.33±0.95	11.0±2.71	32.0
		肥大茎	9.87±2.24	9.24±2.14	45.6	9.94±1.93	12.8±3.31	46.4
		合計	19.0±2.63	23.4±4.60		19.2±2.24	30.7±3.68	
P (g-P m ⁻²)	地上	0.53±0.05	0.61±0.26	12.5	0.66±0.13	0.71±0.27	14.3	
	地下	地下茎・節	2.15±0.34	2.45±0.15	50.9	2.46±0.71	2.85±0.38	53.9
		肥大茎	1.35±0.51	2.07±0.17	36.6	1.57±0.17	1.58±0.90	31.8
		合計	4.03±0.57	5.13±0.39		4.70±0.78	5.15±0.66	
K (g-K m ⁻²)	地上	12.2±1.76	8.67±2.68	21.8	7.88±0.96	4.43±0.72	17.2	
	地下	地下茎・節	11.6±1.02	12.0±2.02	25.3	10.9±3.69	10.0±3.31	29.8
		肥大茎	28.5±6.86	21.8±0.87	52.9	22.8±1.09	15.0±3.50	53.0
		合計	55.3±9.09	42.5±5.04		41.6±4.01	29.5±5.26	

反復はC区でn = 3およびO区でn = 4。

第4表 栽培前土壌および2013年栽培後の土壌pH、陽イオン交換容量 (CEC)、全炭素含量、全窒素含量、交換性カリウム (K) 含量、および可給態リン含量 (平均値±標準偏差)

	pH	CEC (cmolc kg ⁻¹)	全C含量 (g-C kg ⁻¹)	全N含量 (g-N kg ⁻¹)	交換性K含量 (mg-K kg ⁻¹)	可給態リン含量 (mg-P kg ⁻¹)
栽培前	5.47	13.5	18.8	1.79	251	67.6
C区	6.17±0.12	7.77±0.53	15.0±4.44	1.23±0.32	216±15.5	72.5±2.68
O区	6.40±0.12	7.66±2.33	13.3±5.17	1.11±0.45	215±53.5	68.7±6.63

反復はC区でn = 3およびO区でn = 4。

灌漑推量

2012年の移植直前に水位20cmになるように導入した灌漑水量は、全処理区の平均で239mmであった。各処理区の栽培期間中の灌漑水量は2013年のC区で723±24mm、O区で760±120mmであった (第5表)。2012年は5月28日までのデータが欠損となったが、6月以降の灌漑水量はC区で861±14.4mm、O区で753±161mmであり、2012年の4月から5月の灌漑水量を2013年と同量と仮定した場合、2012年の栽培期間中の灌漑水量はC区で1,019±13.2mm、O区で922±163mmであった。以上より栽培前に導入した灌漑水量を考慮すると、調査期間中の平均灌漑水量はC区で1,110±163mm、O区で1,080±158mmであった。灌漑水量は両年共に気温が高く葉数が多い7月から9月にかけて多くなっていた。松山市の月降水量の平年値と灌漑水量の差は8月が最も低く、134mm～305mmの範囲で灌漑水量が降水量を上回った。

第5表 浅床栽培における化学肥料区（C区）および有機肥料区（O区）の灌漑水量と月平均降水量の平年値

		4月	5月	6月	7月	8月	9月
月降水量平年値 (mm)		108	142	224	192	90	130
2012年 灌漑水量 (mm)	C区	ND	ND	69.1	124	289	153
	O区	ND	ND	85.9	207	394	187
2013年 灌漑水量 (mm)	C区	69.7	94.0	67.6	191	223	77.2
	O区	70.1	105	74.6	203	255	78.8
月降水量平年値と 2012年灌漑水量の差 (mm)	C区	ND	ND	154	67.6	-200	-23.1
	O区	ND	ND	138	-15.6	-305	-56.6
月降水量平年値と 2013年灌漑水量の差 (mm)	C区	38.1	47.5	156	0.7	-134	53.1
	O区	37.7	36.8	149	-11.8	-165	51.5

N.D.: データ欠損

考 察

浅床栽培による収量・品質

一般栽培における肥大茎の収量は、茨城県において品種‘寿’で $1.33\sim 1.78\text{kg m}^{-2}$ （折本ら，2007）、‘霞’で $1.06\sim 3.10\text{kg m}^{-2}$ （霞ら，2002）、‘霞ヶ浦’で $2.46\sim 2.95\text{kg m}^{-2}$ （霞ら，2002）、‘中国’で $2.56\sim 3.15\text{kg m}^{-2}$ （霞ら，2002）と報告されている他、新潟県では $1.93\sim 2.16\text{kg m}^{-2}$ （品種未記載 岩本，1985）、佐賀県では $1.61\sim 2.42\text{kg m}^{-2}$ （備中種 南川，1963）が報告されている。本試験の肥大茎の収量は全試験区で試験期間を通して 3.1kg m^{-2} を上回っており、浅床栽培が一般の栽培と比較して収量が多くなる可能性が示された。同時に、有機肥料を用いた栽培においても一般的な栽培法よりも収量が高く、有機栽培条件下においても収量改善を期待できる。本研究でN施肥量が一般栽培よりも2割少なかったにもかかわらず収量が多い理由として、施肥N、特に追肥Nの利用効率が高いことが推察される。本試験の栽培体系ではハスの根の深度が浅く維持されるため、根が深く潜り始めている追肥時に施用されたNが根圏に至りやすい。また、土壌水の地下浸透が無いため、主に硝酸態Nの流亡がない。そのため、施肥Nが効率よくハスに吸収されたと考えられる。また、水の下方への移動に伴う熱の移動も制限されると考えられ、一般的な栽培方法よりも根圏の地温が高く維持されることが考えられる。根圏の地温上昇はハスの生育や土壌の無機化を促進すると考えられ、地力窒素の供給も増加した可能性がある。2年間で土壌全N含量が30%以上減少したことは、上記の可能性を支持している。他の要因として、定植密度が低いことが挙げられる。本試験の定植密度は一般栽培（ $300\sim 350\text{g m}^{-2}$ 、沢田，2010； $168\sim 252\text{g m}^{-2}$ 、南川，1963）と比較して低い。南川（1963）による佐賀県での試験では、本試験と同程度の大きさの種レンコンを一般的な方法に従って分岐ハスを切除せずに植え付けた場合、定植密度が 252g m^{-2} よりも 168g m^{-2} で収量が9%程度増加したとしている。N施肥量が同等で定植密度が低いことはハスの固体あたりの施用N量が相対的に多い事を意味する。これらのことから、施用Nがハスに吸収され易くハスあたりの吸収可能なNが多く

なったことが収量増加の一因と考えられた。

収量はO区よりもC区で多くなる傾向があったが（第2表）、同時にC区の一節あたりの重さと長さがそれぞれ100~200gおよび10~20cmの範囲でO区よりも多い傾向にあった（第3図）。このようなC区での増加の要因としては、O区のK施肥量がC区の3割程度であったことが考えられる。ハスはK施用により収量が増加することが報告されており（南川, 1963）、また生育後期に肥大茎のK含量が増加することが報告されている（小松ら, 1981）。津野・藤瀬（1964）はサツマイモ（*Ipomoea batatas*）におけるKの増加は純同化率を高く維持する効果があることを報告しており、ハスでもK含量の上昇が同化デンプンの蓄積に影響していた可能性があると考えられる。本研究でも肥大茎のK吸収量は全吸収量の5割以上を占めており、地下茎肥大に対するK施用の影響が大きいと考えられる。有機栽培によるハス栽培では、NやPを基準として施用する場合本研究と同様にK施肥量が不足すると考えられ、十分な収量のみならず大きいサイズの肥大茎を得るためにはKを十分に施用する必要がある。

肥大茎の表皮の色は2012年と比較して2013年が白く、品質としては2013年のものが良かった。長島ら（1997）によると肥大茎のL値が高くなるほど表面積あたりの鉄付着量が低下する。これは鉄が付着すると酸化鉄による赤みで明度が下がるためと考えられ、本研究でもL値が低くなるとa値が高くなり赤みが強くなっていた（第4図）。赤みの原因となる酸化鉄が主体の褐変物質は、土壤中に遊離酸化鉄が多いと付着量が多くなることが報告されている（上田ら, 1973）。また、褐変物質の付着は湛水条件において土壤の還元が進むことで抑制されると報告されている（長島ら, 1997；内山ら, 1979）。レンコン田における鉄については、土壤の還元化により土壤溶液中の二価鉄量が増加し、ハスの水分吸収に伴う土壤溶液の移動などにより根近傍に二価鉄が移動し、そこで二価鉄が酸化され褐変物質としてレンコンに付着すると考えられる。本研究では2012年栽培後から2013年栽培開始まで土壤を湛水状態に保ったため、2012年と比較して2013年の活性二価鉄の含量は10倍以上であり、栽培期は土壤の還元が進んだ状態であったと推測される。上述したように、褐変物質は活性二価鉄に由来する土壤溶液中の二価鉄を根が酸化して形成・付着すると考えられる。この二価鉄濃度は湛水後、活性二価鉄の増加に伴い上昇するが、還元がさらに進むと不溶性の硫化鉄（FeS）や水酸化鉄（Fe(OH)₂）の生成により減少に転ずることが知られている（Li and Horikawa, 1998）。FeSはレンコン表皮の黒変物質の主要物質とされているが（長島ら, 1997）、本研究ではL値が2013年の方が高くレンコンがより白くなる傾向にあったことから、還元が強かった2013年でもFeSの生成・付着の増加はなかったと考えられる。ハスの栽培では収穫前に茎刈りを行うが、茎刈り後は地下部への酸素の供給が停止するため根近傍の還元化が進む。この場合、根の周囲の土壤がより強い還元状態であるほど根近傍の還元化も速やかに進行すると考えられる。従って本研究において2013年のレンコンがより白かったのは、2013年の土壤が2012年よりもより還元的な状態となっていたために、茎刈り後の根近傍の酸化還元状態が酸化鉄皮膜が形成される範囲を速やかに超えて低下し、結果的に根に付着した酸化鉄の量が2012年より少なくなったと考えられた。浅床栽培法は土壤水の地下浸透がないことから、非栽培期間中の湛水状態を維持することは比較的容易と考えられ、このことは明度が高く品質の良い肥大茎を生産するのに適した栽培体系であるといえる。

土壤化学性の変化

本研究においては2年間の栽培により土壤の化学性が大きく変化していた（第4表）。土壤pHは6以上に上昇していたが、ハスの生育はpH6程度が適当とされていることから（小松, 1985）、生育

環境は改善されていた。一方で、CECや土壤全Cおよび全N含量、交換性K含量、可給態リン含量は大きく低下しており、土壤肥沃度の低下が認められた。CECの低下は特に大きく、全C含量の減少にともなう土壤有機物の減少が一因と考えられた。白鳥ら（2008）によると、徳島や山口の中粗粒質のレンコン田ではCECが 10cmolc kg^{-1} 程度で他のレンコン産地よりも低いことを報告している。瀬戸内地域の本調査地一帯の地質は領家花崗岩類に分類され一般的に砂質で有機物含量が低い土壤が多く元々CECが低い地域だが、本栽培法を用いたハスの連作はCECをさらに低下させることが懸念される。

2年間で約30%の土壤全N含量の低下は、ハスの連作に際し地力N供給能の低下が懸念される。作土が浅いために施用Nがハスに吸収され易いと考えられ、さらにハスのN吸収量もN施用量と同程度のため、ハスの生長に対する地力N供給の影響は大きくない可能性がある。また試験に用いた土壤は砂質で全N含量は0.2%以下のため、地力Nの供給能は高くないと推測されるが、連作による地力N供給能の低下がハスの生育に与える影響については今後明らかにする必要がある。本栽培体系ではNの流出経路は植物の吸収かもしくは脱窒に限られる。水田における生物的N固定量は1作で約 4g-N m^{-2} とされ（蒲田ら，1987）、また2年間のハスによるN吸収量はN施用量より小さいことを考慮すると、土壤の全N減少量より多い量が2年間に脱窒として失われていると見積もられる。稲作における脱窒量については、山室（1985）が 2.7g-N m^{-2} 、小菅・飯村（1972）が 8.0g-N m^{-2} という値を報告している。本研究での土壤N減少相当量の脱窒量が生じていたとすると、これらの報告値より多量のNが脱窒で失われたと考えられる。浅床栽培法では地温が高くなっていた可能性を前述したが、地温が高く維持されることで脱窒が促進される可能性がある。その他の要因については、栽培体系の確立のためにも今後詳細を明らかにする必要がある。

可給態リン含量の変化は両処理区で一定ではなかった。このことは、施用した肥料のタイプとハスによるP吸収量の違いに加えpH上昇等の要因が影響している可能性がある。O区ではpHの上昇によりC区よりある程度リンが可給態に変化していたと考えられる。しかし、O区では有機態Pの一部が不可給態として存在し、また2年間の植物によるP吸収もC区より大きく、従って可給態リン含量が低下したと考えられる。一方で2年間の栽培後の交換性K含量の低下については、両処理区共にK施用量よりもK吸収量が大きく、土壤有機物等の分解に伴って溶出したKもハスに多く吸収され減少したと推察された。PやKについては生物的N固定の様な流入経路がないため、肥沃度の維持にはこれら栄養素を施肥によって補う必要がある。特にKについてはハスによる2年間の吸収量が 37.8g-K m^{-2} を上回ることから、Nと同様に土壤中の減少量が多い。小松ら（1981）はハスの養分吸収量の季節変化を調べた研究で、 K_2O の吸収量がNと同程度で同様な季節変化を示したことを報告している。また、本研究ではハス全体のK吸収量に占める肥大茎のK吸収割合が両処理区共に50%を超えることから（第3表）、ハスの残渣を土壤に還元したとしてもNやPに比べ収穫物中のKが持ち出されやすい。2013年の肥大茎の収量が2012年と比較して低い傾向にあったことは（第2表）、土壤養分特にKやN含量の低下も一因となっているかもしれない。南川（1963）はハスの栽培においてKの施用が収量増加に影響することを報告している。本研究の結果と合わせ、ハス栽培においてはKが収穫物として圃場外に持ち出される量が多く、そのためにKの施用が収量増加に効果的であると考えられる。

浅床栽培法では栽培後は基本的に植物体を全て持ち出している。これは休耕期における腐敗病原菌の増殖を防ぐ目的で行うが、残渣施用による有機物やN、P、およびKが還元されないことによる肥沃土低下を避けるためには、残渣を堆肥化するなどして別の形態でそれらを補充する必要がある。

また、化学性の多くの項目が低下したことから、これらを補うための栽培管理（施肥や有機物の施用）の確立が必要と考えられた。

ハスの浅床栽培に必要な灌漑水量

本研究ではハス栽培に必要な灌漑水量は約1,000mmであった。茨城県のハス田における調査では、水流出量が約341日間で2,155mm～3,325mmと報告されている（折本、武井, 2007）。折本・武井（2007）の栽培期間中の蒸発散量及び浸透水量をそれらの約半分として計算しても、茨城のレンコン田では水流出量が平均1,969mmとなる。本研究はハス栽培期間（平均174日）の調査であるが、浅床栽培において必要な灌漑水量は一般的な栽培体系の約半分程度であった。愛媛と茨城では気温も違うことから、同じ気候条件ではさらに少ない灌漑水量での栽培が可能と考えられる。本研究では栽培期間中の灌漑水量は降水量の平年値（884mm）よりも200mm程度大きい、特に葉が繁茂し気温が高い7月から9月は蒸発散量が降水量を上回り（第5表）、この時期には適切量の水供給が必要と考えられた。収穫時の水掘りでは、レンコンが土壌の浅い位置にあるために灌漑水を用いる必要はほとんどなく、田面水の循環利用が十分可能であった。一般的に水稻栽培において必要な灌漑水量は2,000mm～3,000mmとなっている（長谷川, 1995）。従って水田用に整備された灌漑設備は十分に浅床栽培にも用いる事ができると考えられる。

適 用

レンコンの栽培は収穫時に多大な労力が必要なことが問題となっている。近年確立された省力で収穫可能な浅床栽培法を用いてハスの栽培を行い、生育・収量・土壌化学性の変化および灌漑水量について評価を行った。2012年と2013年に、作土を10cmに充填した枠を用い化学肥料（C区）または有機肥料（O区）を用いた2処理区を設けた。窒素とリンの施用量はC区とO区で同等であったが、O区には油かすと鶏糞を用いたためにカリウムはC区の3割程度であった。肥大茎の収量（3.15～3.93kg m⁻²）は処理区間の違いはなく、一般的な栽培体系での収量より大きかった。一方、C区で一節あたり100～200gがO区よりも多くなる傾向が見られた。ハスに吸収されたカリウムの約50%が肥大茎にあったことから、カリウム施用量が多いC区で肥大茎の生長に影響したと考えられた。肥大茎の色は2013年が2012年よりも有意に白かった。これは非栽培期間に土壌を湛水状態に保ったため2013年の栽培期の土壌がより還元的になり、肥大茎に付着する酸化鉄が減少したためと考えられた。陽イオン交換容量、土壌全炭素・窒素含量および交換性カリウム含量は2作付け後に14～55%低下しており、有機物の施用などによって土壌有機物の分解やハスの生長による土壌養分の減少を補う必要がある。栽培に必要な灌漑水量は1,000mm程度であり比較的水の必要量は少なかったが、7～9月の繁茂期には蒸発散量が降水量を上回るために灌漑が必要である。以上より、浅床栽培法によるハスの省力栽培は収量の増加や品質の向上が見込まれるが、土壌肥沃度を保つために有機物施用等を含めた栽培体系の確立が必要であることが明らかとなった。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、試験区の設置および管理で多大なるご協力をいただいた愛媛大学農学部附属農場の山下陽一氏、阿立真崇氏、および石掛桂士氏に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

引用文献

- (1) Asami T・Kumada K (1960) Comparison of several methods for determining free iron in soils. *Soil and Plant Food*, 5, 179-183.
- (2) Doane TA・Horwath WR (2003) Spectrophotometric Determination of Nitrate with a Single Reagent. *Anal. Lett.*, 36, 2713-2722.
- (3) 長谷川周一 (1995) 水収支および水管理の違いに基づく水田の類型化. *ペドロジスト*, 39, 99-106.
- (4) 岩本信義 (1985) レンコンに対する液肥の追肥. *土肥誌*, 56, 156-157.
- (5) 日高伸 (2000) 吸光光度法 (インドフェノール青吸光光度法). *土壤環境分析法編集委員会編 土壤環境分析法*, p.243-245, 博友社, 東京.
- (6) 蒲田昌治・甲斐秀昭・河口定生・川内埜一之 (1987) 除草剤施用による水田土壌の遊離窒素固定微生物相と窒素固定能の変動. *土肥誌*, 58, 517-527.
- (7) 霞正一・小松鋭太郎・八城和敏・佐久間文雄・雨ヶ谷洋・江面浩・西宮聡・宮川雄一・飯田伸彦・石塚由之 (2002) 食用ハスの中手品種 '霞ヶ浦' および早生品種 '早霞' (はやか) の育成とその特性. *茨木農総生工研報*, 5, 61-69.
- (8) 小松鋭太郎・篠崎佳信・石塚由之 (1981) 食用ハスの生育経過と養分吸収. *茨城園試研報*, 9, 7-22.
- (9) 小松鋭太郎 (1985) レンコン (施肥技術). *作物別施肥技術, 土壤施肥編, 農業技術体系, 技術* 305-308, 農文協, 東京.
- (10) 小松鋭太郎・石塚由之・松沢義郎 1989. レンコン栽培田における三要素の動向と収支について. *茨城園試研報*, 14, 90-109.
- (11) 小笹道俊 (2008) 浅床栽培槽による蓮根の栽培方法および栽培装置, P2008-173104A.
- (12) 小菅伸郎・飯村康二 (1972) 水田土壌における脱窒量の測定について. *土肥誌*, 43, 388-389.
- (13) Li Z・Horikawa Y (1998) Stability behavior of soil colloidal suspensions in relation to sequential reduction of soils. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 44, 227-235.
- (14) 牧山正男 (2010) レンコン主要産地における収穫方法とその変遷. *農業農村工学要旨集*, 546-547.
- (15) 松山地方気象台 2014. 過去の気象データ,
http://www.jma-net.go.jp/matsuyama/kensaku/kako_kensaku.html.
- (16) 南条正巳 (2000) トルオーグ法. *土壤環境分析法編集委員会編 土壤環境分析法*, p.267-269, 博友社, 東京.
- (17) 南川勝次 (1963) 食用ハスに関する研究. *佐賀県農試研報*, 4, 43-47.
- (18) 村本穰司・後藤逸男・蜷木翠 (1992) 振とう抽出法による土壌の交換性陽イオンおよび陽イオン交換容量の迅速分析. *土肥誌*, 63, 210-215.
- (19) 本村悟 (2011) 水田土壌中の 2 価鉄の定量法. *土壤養分測定法委員会編 土壤養分分析法 (OD 版第 1 版)*, p.316-332. 養賢堂, 東京.
- (20) 長島律・多田敦・東照雄 (1997) レンコン表皮の黒変・褐変減少の発生状況と土壌の酸化還元状態との関係—ハス田の圃場整備に関する基礎的研究 (I)—. *農業土木学会論文集*, 65, 411-418.
- (21) 農林水産省 (2013) 統計情報 青果物卸売市場調査.

URL: http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/seika_orsosi/#m.

- (22) 農林水産省 (2010) 環境保全型農業関連情報 愛媛県施肥基準 野菜.
URL: http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/ehi01.html.
- (23) 折本善之・武井昌秀 (2007) レンコン栽培における被覆肥料を用いた窒素の減肥および節水管理が収量および窒素排出量に及ぼす影響. 土肥誌, 78, 363-369.
- (24) 沢田英司 (2010) 第3章2 導入するにあたって, レンコン 栽培から加工・販売まで. p.58-64, 農文協, 東京.
- (25) 志賀一一 (2011) 遊離酸化鉄. 土壤養分測定法委員会編 土壤養分分析法 (OD版第1版), p.329-330. 養賢堂, 東京.
- (26) 白鳥豊・長井隆・犬伏和之 (2008) レンコン葉枯れ症と土壤のカルシウム肥沃度との関係. 土肥誌, 79, 189-192.
- (27) 高井康雄・加村崇雄・足立勇 (1958) 水田土壤における鉄化合物の行動について (第2報) Fe II 溶出条件の再検討. 土肥誌, 29, 216-220.
- (28) 津野幸人・藤瀬一馬 (1964) 甘藷の乾物生産に関する研究 等3報 養分吸収と乾物生産との関係. 日作紀, 32, 297-300.
- (29) 上田弘美・西尾一雄・衣笠義人 (1973) レンコン導入に適する土壤条件. 中国農業研究, 46, 64-65.
- (30) 内山善雄・吉松敬祐・井口卓平 (1979) れんこん表皮の褐変に関する研究 (第2報) 褐変に及ぼす土壤還元と茎葉が供給する酸素の影響. 園学雑, 47, 473-478.
- (31) 山室成一 (1985) 半湿田土壤における施肥および土壤無機化窒素の有機化, 脱窒および水稲による吸収と堆肥施用量との関係. 土肥誌, 56, 15-20.